Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 2. С. 188–195. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 2, pp. 188–195. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 62-50
https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195



Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов

А. К. Тугенгольд[1], Е. А. Лукьянов[2], Р. Н. Волошин[3], В. Ф. Бонилья[4]
[1, 2, 3] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[4] Технологический университет (г. Кито, Республика Эквадор)

Введение. Исследуются, в основном, цифровые системы, которые управляют обслуживанием отдельных технологических мехатронных объектов (ТМО) и комплексов технологических машин. Отмечена многочисленность вопросов поддержания надежности состояния и возникающих неисправностей, а также многофакторность применения существующих систем мониторинга и диагностики. В связи с этим указано на актуальность задач разработки методов и способов обслуживания технологического оборудования, позволяющих принимать решения в условиях неопределенности и ограниченности данных.
Материалы и методы. Для анализа критичности технического состояния сформирована оценка качества эффективности автономного управления состоянием устройств. При этом используется метод нейронечеткой системы определения совокупного критерия критичности. Предлагается применять этот подход для выработки рекомендаций по оснащению технологического объекта необходимыми средствами поддержания общей работоспособности и надежности.
Результаты исследования. Решение позволяет прогнозировать развитие состояния мехатронного технологического оборудования, оповещать персонал об аварийных и иных опасных состояниях, при необходимости проводить доработку или корректировку управляющих программ. Предусматривается выполнение части функций обслуживания технического состояния самим мехатронным объектом, т. е. самообслуживание оборудования. Сформулировано понятие «автономное управление техническим состоянием». Рассмотрены структура системы и функции управления. Отмечено, что внедрение рассматриваемых систем позволит в значительной степени повысить эффективность использования оборудования. Результативность автономного управления устройства или ТМО в целом оценивается в соответствии со стандартом ISO 13381-1:2004. На основании этого стандарта и данных, представленных ранее, построена структура нейронной сети для оценки автономности управления состоянием. Эффективность обучения системы рассмотрена с учетом среднеквадратического отклонения выходов сети от целевых значений обучающей выборки.
Обсуждение и заключение. Представлен перечень основных функций управления при разных уровнях автономности технического обслуживания: от сигнализации для предупреждения отказа до полной автономности технического обслуживания без непосредственного участия оператора.

Ключевые слова: цифровые системы, автономное обслуживание, управление техническим состоянием, критичность состояния.

Для цитирования: Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов / А. К. Тугенгольд, Е. А. Лукьянов, Р. Н. Волошин, В. Ф. Бонилья // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 2. — С. 188–195. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195

Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic process facilities

A. K. Tugengol'd[1], E. A. Luk`yanov[2], R. N.Voloshin[3], V. F. Bonilla[4]
[1,2,3] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[4] University of Technology (Quito, Republic of Ecuador)

Introduction. Digital systems that control the maintenance of separate mechatronic process facilities (MPF) and sets of production machines are mainly considered. Numerous issues on maintaining the reliability of the condition and emerging malfunctions, as well as the multifactorial nature of the using the existing monitoring and diagnostic systems, are noted. In this regard, the relevance of the tasks of developing methods of processing equipment maintenance to make decisions under the data veracity and limitation is specified.
Materials and Methods. To analyze the criticality of the technical condition, an assessment of the efficiency of the autonomous control of the device state is formed. The method of the neuro-fuzzy system is used to determine the aggregate criterion of criticality. It is proposed to apply this approach to develop recommendations on equipping a production facility with the necessary means of maintaining overall performance and reliability.
Results. The solution provides predicting the development of the state of mechatronic process equipment, alerting personnel in case of emergency and other dangerous conditions, and, if necessary, updating or adjusting control programs. Provision is made for performing of some of the technical state maintenance functions by the mechatronic facility itself, i.e., equipment self-service. The concept of "autonomous management of the technical condition" is formulated. The system structure and control functions are considered. It is noted that the implementation of the systems under consideration will significantly increase the efficiency of the equipment use. The performance of the autonomous control of the device or MPF in general is evaluated in accordance with ISO 13381-1: 2004. Based on this standard and the data presented earlier, a neural network structure is built to assess the autonomy of state management. The system training efficiency is considered taking into account the standard deviation of the network outputs from the target values of the training sample.
Discussion and Conclusion. A list of the basic control functions at different levels of maintenance autonomy is presented: from alarm for failure prediction to complete maintenance autonomy without the direct involvement of an operator.

Keywords: digital systems, autonomous maintenance, technical condition management, critical condition.

For citation: A. K. Tugengol'd, E. A. Luk`yanov, R.N.Voloshin, et al. Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic process facilities. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 188–195. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-2-188-195

Введение. Уже более 50 лет в области технического обслуживания машин проводятся серьезные разработки, которые фокусируются на методах и стандартах поддержания работоспособного состояния оборудования. Создаются новые устройства и методы для определения аварийных состояний, идентификации неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса. Контроль и мониторинг состояния имеют особое значение для технологических мехатронных объектов промышленных предприятий — таких, как: станки с числовым программным управлением (ЧПУ), машины кузнечного и литейного производства, автоматизированные гибкие линии и пр. Методы обслуживания оборудования приобретают различные формы [1, 2], у каждой из которых есть плюсы и минусы, влияющие на уровень контроля технологического состояния оборудования. Такой контроль и обеспечение надежности машин являются актуальными научными задачами. Данной теме посвящены многочисленные исследования. В качестве примера можно привести работы [3–14]. Российские и зарубежные ученые рассматривают, в основном, вопросы создания автоматизированных систем мониторинга и диагностики. При использовании для автоматизации методов искусственного интеллекта создаются процессорные модули, получившие обобщенное название «системы электронного обслуживания (e-maintenance)».

Цифровые системы электронного обслуживания реализуются совокупностью программно-аппаратных компонентов, которые предназначены для получения сенсорной информации и оценки состояния оборудования в режиме реального времени. С их помощью прогнозируют изменения состояния технологического оборудования, его узлов, формируют сообщения о необходимости определенных действий со стороны специалистов, в некоторых случаях изменяют параметры работы оборудования. Рассматриваемые системы применяются для персональной диагностики и мониторинга технического состояния отдельных мехатронных объектов. Кроме того, их задействуют в системе обслуживания группы технологических машин.

В фокусе актуальных исследований — создание программ и алгоритмов проведения обслуживания и анализа его результатов. На это нацелены разработки в области качества обслуживания и эффективности использования оборудования. На современных производствах для сервисного обслуживания применяются такие системы, как Casip, Enigma, Icasame, RemoteDataSentinel, Intermor, INID, IPDSS, Proteus, MRPOS, WSDF, Telma и др. [15–18].

Следует отметить многочисленность вопросов поддержания надежности состояния и возникающих неисправностей, а также многофакторность применения существующих систем мониторинга и диагностики. В связи с этим остаются актуальными задачи разработки методов и способов обслуживания технологического оборудования, позволяющих принимать решения в условиях неопределенности и ограниченности данных.

В последние годы изменился основной функционал систем контроля, мониторинга и диагностики, средств, методов и технологий обслуживания, прогнозирования и анализа состояния оборудования. Они переориентированы с анализа технического состояния на предупреждение и обнаружение неисправностей на ранних стадиях эксплуатации. Разрабатываются такие способы контроля, которые позволяют минимизировать влияние возникающих неисправностей на работоспособность и время простоя оборудования, на количество бракованных деталей и частоту отказов. В конечном итоге новые подходы обеспечивают снижение экономических потерь.

Актуальным стал вопрос о разработке нового решения, основанного на интеллектуальности системы. Речь идет о создании автоматизированного автономного управления обслуживанием и, как следствие, об управлении автономным техническим состоянием оборудования.

Автономное техническое обслуживание (АТО) [19] — это комплексное определение. Применительно к станкам оно подразумевает такое автоматическое выполнение функций сервиса и обслуживания, при котором оборудование самостоятельно поддерживает свою работоспособность (самообслуживание). Если же в обслуживание необходимо вмешаться человеку, функции сервиса остаются в руках оператора, то есть проблемы устраняются оперативно, без привлечения внешних ремонтных служб и до окончания производственного цикла.

Автономность обслуживания технологических мехатронных объектов (ТМО) в ключе, представленном ранее, — пока не реализованное, но перспективное решение. Ожидается, что методы искусственного интеллекта в сфере диагностики и сервисного обслуживания получат уровень знаний, равный уровню обслуживающего персонала.

Материалы и методы. На современном этапе развития технологий рассмотрим понятие АТО ТМО в следующей интерпретации. Цель решения — поддержание или восстановление работоспособности на основе оценки состояния компонента и ТМО в целом. Для этого самостоятельное автоматизированное управление целенаправленно отображает состояние и необходимые воздействия на компоненты ТМО [20].

Как отмечалось ранее, основным подходом для создания и развития автономности при управлении работоспособностью технологического оборудования является применение методов искусственного интеллекта и интеллектуального управления в условиях неопределенности и нечеткости предоставленных знаний [21].

Результаты исследования. В условиях неопределенности рассмотрим процедуру управления как зависимость реального состояния от целевого (исправная работа):

$$R^* = A \to B,$$

где A и B — экспертные заключения о реальном и целевом состоянии ТМО.

Представление результата нечеткого вывода Y зависит от:

— наблюдаемых данных X, полученных системой диагностики;

— системы знаний $A \to B$;

— наличия коэффициента K, отвечающего за возможную погрешность измерений.

Следовательно, вывод Y принимает вид:

$$Y = X \times R^* + K = X \times (A \to B) + K,$$

где $Y = \{Y_1, Y_2, \ldots, Y_m\}$ — параметры, отвечающие за управление состоянием оборудования и за вывод команд для оператора; $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$ — данные о входном состоянии оборудования.

Используя такую трактовку автономности технического обслуживания, рассмотрим структуру и функции АТО ТМО (рис. 1).

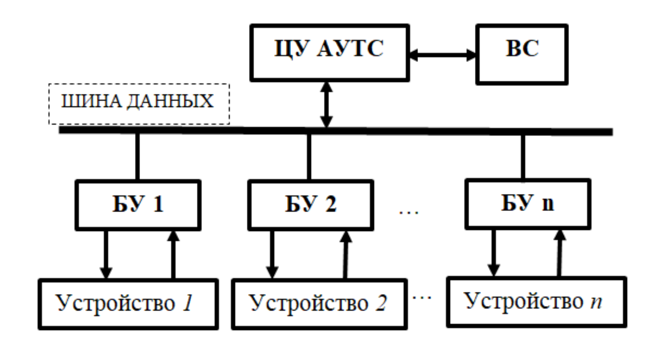


Рис. 1. Структура системы управления техническим состоянием оборудования

Здесь сигналы с датчиков от диагностической системы поступают на устройство управления не напрямую, а через блок управления техническим состоянием узлов (БУ ТС).

Узлы блока управления получают данные с центрального узла автономного управления технологической системы (ЦУ АУТС), который:

— координирует работу и обслуживание всех узлов станка;

— обрабатывает данные, полученные от диагностических систем;

— на основе этих данных анализирует состояние, прогнозирует развитие неисправностей и принимает решения о необходимых действиях по обеспечению бесперебойной работы оборудования.

В предлагаемом подходе к обобщенным функциям управления техническим состоянием ТМО рассматриваются способы управления при помощи сигнализации о возможности наступления отказов, об аварийных ситуациях, о необходимости нечеткой полосы работоспособности устройства и др. [22].

Электронная система обслуживания (например, e-Mind Machine) может обеспечивать информационную связь АУТС объекта через ВС с подразделениями обслуживания и ремонта оборудования и управляющими структурами предприятия [23].

К функциям автономного управления относится принятие решений по поведению системы при неисправности, поэтому система должна обучаться во время работы. Таким образом, методы диагностики и мониторинга совершенствуются, что позволит устранять неизвестные ранее неисправности.

Аналитическими методами сложно (или невозможно) адекватно представить состояния и изменения ТМО. Это обусловлено перечисленными ниже особенностями технического обслуживания такого оборудования:

— сложность структуры мехатронного объекта, состоящего из большого числа узлов;

— многообразие факторов, влияющих на надежность и работоспособность, точность и производительность машин;

— большой диапазон свойств материалов, из которых изготовлены детали;

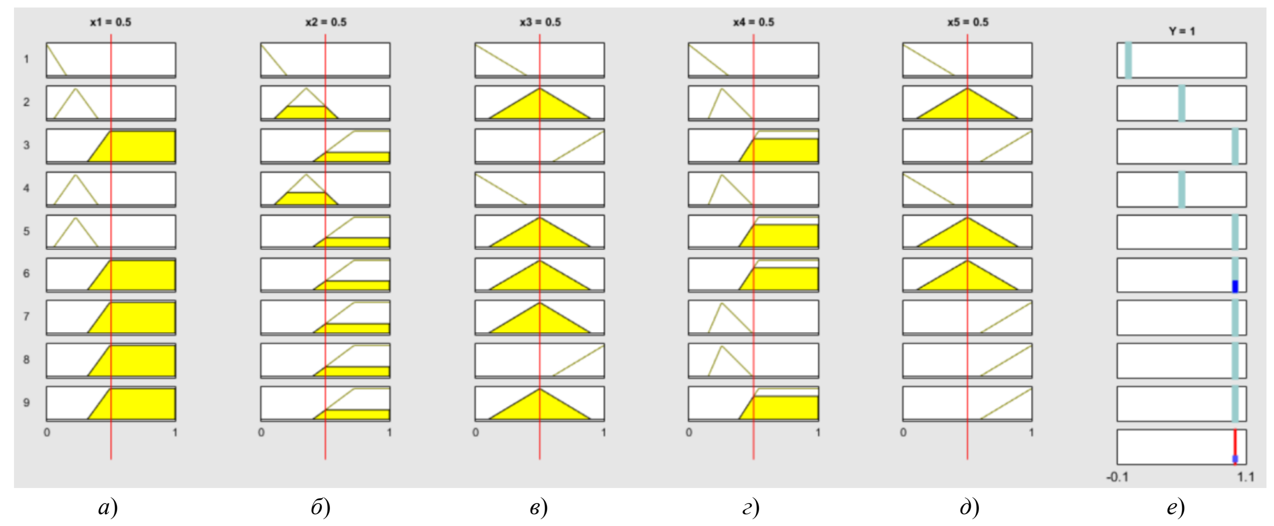
— разнообразие требований к функционалу, параметрическим характеристикам и качеству работы блоков, модулей и устройств в соответствии с их назначением, точностными характеристиками, реализуемыми производственными задачами.

Концепция e-MindMachine обеспечивает управление с учетом данных о реальном состоянии объекта и истории эксплуатации. При этом прогнозируется развитие неисправностей для каждого узла. Предлагается использование гамма-процентного ресурса надежной работы, если доступны статистические данные или применяется пограничная полоса работоспособности [22–24].

При разработке АУТС технологических объектов можно предусмотреть ранжирование уровней автономности в зависимости от применяемого на предприятии обслуживающего аппарата [25, 26]. Это зависит также от критичности машины в общем составе производства. В данном случае критичность определяет, насколько важна для производства та или иная его единица. Чем выше критичность, тем больше экономических, физических или временны́х потерь понесет предприятие от простоя этой единицы. Такие данные основываются на статистике использования оборудования, числа отказов, времени простоя, стоимости запасных частей и изготавливаемых деталей, количества рабочих смен и т. п.

При анализе критичности также важно учитывать будущие состояния машины, степень развития неисправностей, планирование приобретения запасных частей. Это необходимо для оценки остаточного ресурса и расчета времени до возможного отказа в условиях неопределенности и стохастичности данных о состоянии оборудования. Оценка критичности позволит выяснить, насколько важным для предприятия является данная единица оборудования, какими затратами обернется остановка и восстановление работы.

Для анализа максимального количества параметров, влияющих на критичность отказов, построим систему обобщенной оценки критичности технического состояния устройств ТМО. Для выходного совокупного критерия критичности используем оценку на базе нейронечеткой системы ANFIS в среде MATLAB. Как пример рассмотрим критичность отказов шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка HAAS SMM (рис. 2).



а) *б*) *в*) *г*) *д*) *е*)

Рис. 2. Оценка критичности отказов. Красная вертикальная линия — показатель 0,5: производительность и точность оборудования (*а*); стоимость ремонта оборудования и запасных частей (*б*); стоимость простоя оборудования (*в*); количество отказов оборудования (узла) за определенный период (*г*); время на идентификацию и устранение неисправности (*д*); $Y = 1$ — полное соответствие выходным параметрам (*е*)

Как видно из рис. 2, входные воздействия в нейронечеткой системе отвечают за все основные аспекты, которых касается работа оборудования на предприятии [27]. В результате на выходе из системы получаем обобщенный критерий критичности Y, величина которого может варьироваться от 0 до 1. Здесь $Y = 0$ — входные параметры не соответствуют требованиям производства. По данным мониторинга, параметры вышли за пределы $0 < Y < 1$, но эксперт может сделать заключение о пригодности оборудования (например, при $Y = 0{,}75$). Используя такую методику оценки критичности, при определении работоспособности однотипного оборудования можно обозначить диапазон реагирования по возникающим неисправностям и создать новую систему принятия решений в условиях неопределенности. Таким образом, наиболее важное (критичное) оборудование получает максимальный отклик со стороны оператора и обслуживающего персонала для поддержания его работоспособности.

Методы нечеткой логики позволяют упростить интеллектуальную систему управления, оперативно оценивать состояние объекта. Речь идет об автономном управлении техническим состоянием объекта, поэтому необходимо разобраться с тем, насколько глубокой может быть автономность. Станок рассматривается вместе с оператором, а значит, оборудование управляется автоматически и действиями оператора. Уровни управления зависят от функций, возложенных на человека.

Уровень 1. Контроль. Определяется наличием или отсутствием аварийной неисправности, которая приводит к останову оборудования.

Уровень 2. Диагностика. Проводится анализ данных о состоянии оборудования встроенными или навесными сенсорами.

Уровень 3. Мониторинг. Определяется текущий уровень работоспособности, принимаются оперативные или тактические решения.

Уровень 4. Оператор выполняет все основные функции без средств автоматизации станка. Они могут быть выведены на экран в качестве инструкции.

Уровень 5. Оператор выполняет часть функций, не требующих отклонения от производственных задач.

Уровень 6. Автономность сервиса ТМО без непосредственного участия оператора.

Если необходимо поддерживать работоспособность оборудования на высоком уровне, целесообразно задействовать мониторинг (3-й уровень). Использование на 4-м уровне некоторой автоматизации представляется переходом к созданию интеллектуальных систем обслуживания.

Внедрение рассматриваемых систем позволит в значительной степени повысить эффективность оборудования. Продуктивность автономного управления устройства или ТМО в целом оценивается в соответствии со стандартом ISO 13381-1:2004. На основании этого стандарта и данных, представленных ранее, построим структуру нейронной сети оценки автономности управления состоянием (рис. 3).

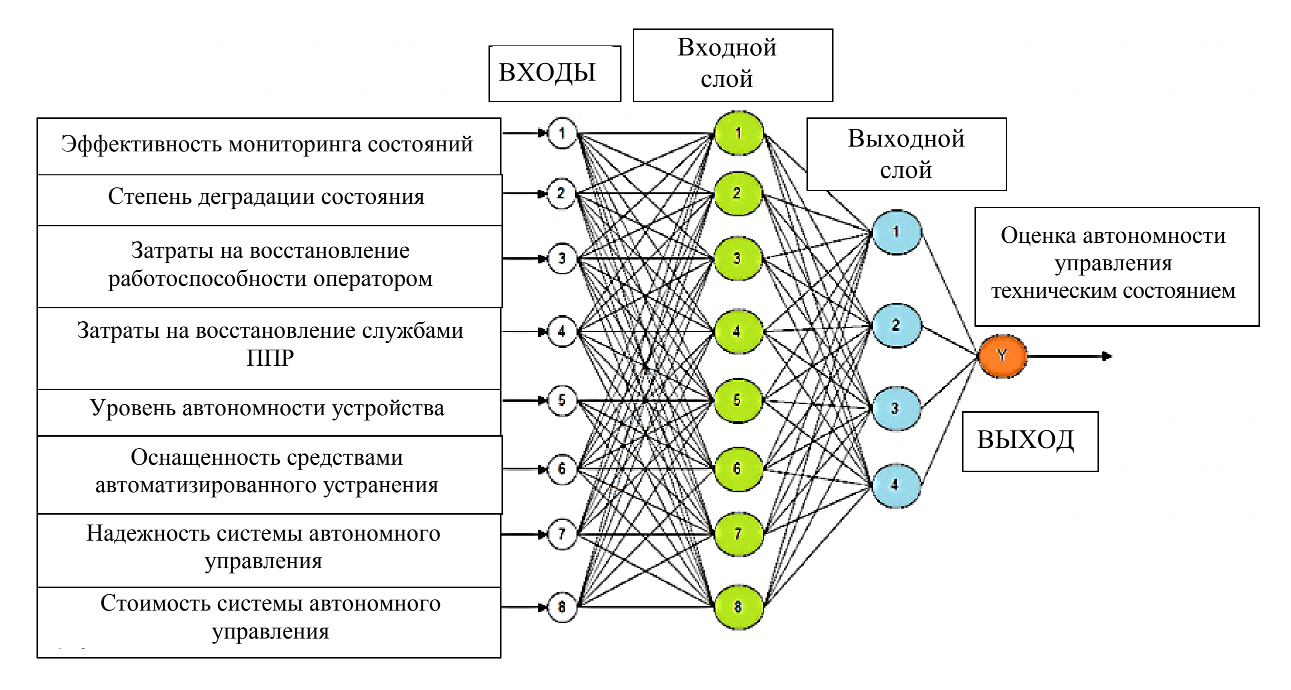


Рис. 3. Структура нейронной сети оценки автономности управления состоянием[1]

Эффективность обучения оценивалась с учетом среднеквадратичной ошибки отклонений выходов сети от целевых значений обучающей выборки [20].

Обсуждение и заключение. В статье представлены основные положения и подходы, позволяющие проектировать, создавать и совершенствовать автономные системы управления техническим состоянием технологического оборудования. Работа таких систем предполагает значительную неопределенность и ограниченность априорных и текущих данных для принятия решений. Этим продиктована необходимость внедрения современных технологий и методов искусственного интеллекта.

Представлен авторский взгляд на роль, функции и построение систем обслуживания ТМО и другого оборудования. Предложенный подход основан на использовании цифровых технологий обработки информации и принятия решений, что обусловлено ростом сложности ТМО. В каждой технологической системе в той или иной мере реализуются принципы открытости, автономности и управления прецизионными движениями. Это необходимо учитывать при проектировании процессов обработки деталей и при реализации процессов поддержания работоспособности оборудования.

Библиографический список

1. Мальцев, А. И. Мониторинг технического состояния крупных машин / А. И. Мальцев, А. А. Мальцев. — Электросталь : ДАМО, 1998. — 62 с.

2. Никитин, Ю. Р. О построении системы диагностирования станков с ЧПУ / Ю. Р. Никитин, И. В. Абрамов // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2011. — № 4. — С. 32–35.

3. Muller, A. Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation

[1] ППР — планово-предупредительный ремонт.

on industrial system / A. Muller, M.-C. Suhner, B. Iung // Reliability Engineering and System Safety : [сайт]. — 2008. — Vol. 93 (2). — P. 234–253. — URL: https://ideas.repec.org/a/eee/reensy/v93y2008i2p234-253.html (дата обращения: 15.05.2020).

4. Lee, J. Intelligent prognostics tools and e-maintenance / J. Lee, J. Ni, D. Djurdjanovic [et al.] // Computers in Industry. — 2006. — Vol. 57. — P. 476–489.

5. Djurdjanovic, D. Watchdog Agent — an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction / D. Djurdjanovic, J. Lee, J. Ni // Advanced Engineering Informatics. — 2003. — No. 17 (3). — P. 109–125.

6. Moore, W. J. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritisation of maintenance activities / W. J. Moore, A. G. Starr // Computers in Industry. — 2006. — Vol. 57. — P. 595–606.

7. Круглова, Т. Н. Диагностирование и прогнозирование технического состояния мехатронных модулей движения технологического оборудования / Т. Н. Круглова, Н. А. Глебов. — Новочеркасск : Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2011. — С. 119.

8. Emmanouilidis, C. E-Maintenance update: the road to success for modern industry / C. Emmanouilidis, E. Jantunen, E. Gilabert [et al.] // COMADEM : proc of the 24th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, 30 May - 1 June, 2011. — Norway, Stavanger // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/258006515_e- aintenance_update_the_road_to_success_for_modern_industry (дата обращения: 15.05.2020).

9. Wang, P. Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks / P. Wang, G. Vachtsevanos // Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. — 2001. — No. 15. — P. 349–365.

10. Zhang, W. An agent-based platform for service integration in E-maintenance / W. Zhang, W. Halang, C. Diedrich // Industrial technology : proc. of IEEE international conference. Slovenia, Maribor. — 2003. — Vol. 1. — P. 426–433 // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/4070917_An_agent-based_platform_for_service_integration_in_E-maintenance (дата обращения: 15.05.2020).

11. Lee, J. E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation / J. Lee // Robot. Comput.-Integr. Manuf. — 2003. — 19 (6). — P. 501–507.

12. Mitchell, J. MIMOSA — four years later / J. Mitchell, T. Bond, K. Bever, N. Manning // Journal of Sound and Vibration. — 1998. — No. 11. —P. 12–21.

13. Lee, J. Prognostics and health management design for rotary machinery systems — reviews, methodology and applications / J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2014. — No. 42. — P. 314–334.

14. Cao, X. Development of SOA Based Equipments Maintenance Decision Support System / X. Cao, P. Jiang // Intelligence Robotics and Applications : proc. First International Conference, ICIRA, Wuhan, China, 15–17 October, 2008. — Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag; 2008. — Part II, vol. 5315. — P. 576–582.

15. Rissland, E. L. Combining case-based and rule-based reasoning: A heuristic approach / E. L. Rissland, D. B. Skalak // Proc. of the 11th International joint conference on Artificial intelligence (IJCAI-89). Michigan, Detroit. — Vol. 1. — P. 524–530 // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/220816256_Combining_Case-Based_and_Rule-Based_Reasoning_A_Heuristic_Approach (дата обращения: 15.05.2020).

16. Bangemann, T. PROTEUS — An integration platform for distributed maintenance systems / T. Bangemann, D. Reboul, J. Scymanski [et al.] // Computers in Industry. — 2006. — Special issue on E-maintenance, 57 (6). — P. 539–551.

17. Karray, M. H. A component based system for S-maintenance / M. H. Karray, B. Chebel-Morello, C. Lang, N. Zerhouni // ResearchGate : [сайт]. — URL: https://www.researchgate.net/publication/252048503_A_component_based_system_for_S-maintenance (дата обращения 15.05.2020).

18. Muller, A. On the concept of e-maintenance: Review and current research / A. Muller, C. Marquez, B. Iung // Journal of Reliability Engineering and System Safety. — 2008. — No. 93. — P. 1165–1187.

19. Тугенгольд, А. К. Модуль E-Mindmachine в интеллектуальной системе мониторинга станка / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, С. В. Ющенко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2008. — № 9 (40), ч. 2. — С. 100–102.

20. Тугенгольд, А. К. Управление техническим состоянием станков / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, В. П. Димитров [и др.] // СТИН. Станки. Инструмент. — 2018. — № 7. — С. 8–15.

21. Тугенгольд, А. К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин // А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — № 4. — С. 51–58.

22. Tugengol'd, A. K. Monitoring and Control of Tools in Multifunctional Machine Tools / A. K. Tugengol'd, V. P. Dimitrov, A. I. Izyumov, A. R. Yusupov // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, no. 5. — P. 440–446.

23. Tugengol'd, A. K. Monitoring of Machine Tools // A. K. Tugengol'd, V. P. Dimitrov, R. N. Voloshin, L. V. Borisova // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37, no. 8. — P. 440–446.

24. Пуш, В. Э. Автоматические станочные системы / В. Э. Пуш, Р. Пигерт, В. Л. Сосонкин. — Москва : Машиностроение, 1982. — 320 с.

25. Autonomous Maintenance of Digital Equipment / A. K. Tugengol'd, V. P. Dimitrov, L. V. Borisova [et al.] // Russian Engineering Research. — 2019. — Vol. 39, № 6. — P. 510–515.

26. Структура и алгоритм работы системы диагностики состояния многооперационного станка / А. В. Ядченко, М. Ю. Соломыкин, А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Современные научные исследования и разработки. — 2017. — № 8 (8). — С. 232–237.

27. Тугенгольд, А. К. Критерии критичности при анализе состояния технологических машин / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 288–292.

Сдана в редакцию 19.02.2020
Принята к публикации 09.04.2020

Об авторах

Тугенгольд Андрей Кириллович, профессор кафедры «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: E-5707-2018, ORCID: https://https://orcid.org/0000-0003-0551-1486, akt0yandex.ru

Лукьянов Евгений Анатольевич, заведующий кафедрой «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6363-6511, lukevgan@gmail.com

Волошин Роман Николаевич, аспирант кафедры «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6147-2907, r.voloshin2909@gmail.com

Бонилья Венегас Феликс Владимир, доцент кафедры «Мехатроника» Технологического университета (EC170528, Республика Эквадор, г. Кито, ул. Оксидентал и Мариана де Хесус), кандидат технических наук, доцент, ScopusID 57195722104, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6542-9666, vbonilla@yahoo.com

Заявленный вклад соавторов

А. К. Тугенгольд — разработка понятий, постановка целей и задач, математическое обоснование задач, теоретическое описание решений, разработка уровней управления состоянием, оценка автономности управления состоянием с использованием нейросети. Е. А. Лукьянов — математические расчеты, построение структурных схем, обоснование использования различных уровней управления, формулировка вывода. Р. Н. Волошин — написание обзора по теме, обработка текста, оценка критичности, работа со стандартами, построение структуры нейросети. В. Ф. Бонилья — работа с иностранными источниками, обработка текста, построение зависимостей на базе нейронечеткой системы ANFIS в среде MATLAB.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.